Distribución granulométrica, geometría y análisis de fracturación de arenas de fracking por visión artificial

Oscar Daniel Chuk[1], C. Gustavo Rodriguez Medina[1], Adriana Luna[1,2]

[1]*Instituto de Investigaciones Mineras, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.*
[2]*Ministerio de Minería, Provincia de San Juan.*

Resumen— La fracturación hidráulica realizada para extraer hidrocarburos de yacimientos no convencionales requiere de la inyección de arenas que actúan como apuntalantes de la fractura. La calidad de las arenas para cumplir dicha función se evalúa por la norma API19C, que establece medidas geométricas –esfericidad y redondez- más un porcentaje de fractura cuando la muestra es sometida a compresión. Todas estas mediciones deben encontrarse dentro de valores límites para asegurar la calidad de la arena.

Según la norma, en lo que respecta a la capacidad para soportar una fractura se debe analizar la distribución granulométrica de una muestra antes y después de efectuar una compresión. Si el porcentaje de finos por debajo de un cierto tamaño ha crecido más de un 10%, la arena no es apta. Esto exige un trabajo de laboratorio importante en términos de recursos humanos y tiempo.

Una forma de tener una aproximación rápida de los valores necesarios es por medio de la inspección de la muestra por visión artificial, determinando la distribución granulométrica de pesos retenidos y acumulados en una forma semejante a la tradicional por medios mecánicos pero en una forma más ágil, lo cual se presenta en este trabajo.

El análisis por visión artificial permite al mismo tiempo encontrar una estimación de porcentajes de especies minerales presentes en la muestra y determinar otras medidas geométricas importantes establecidas por la norma, la redondez y la esfericidad.

Si bien existen algunos programas comerciales que estiman estos valores, las medidas no son siempre consistentes y no están expresadas en términos de la norma API19C, de tal forma de permitir una evaluación rápida de una arena de fracking. El software generado a partir del algoritmo que se presenta en este trabajo se presenta como una alternativa comercial importante para un mercado en rápido crecimiento.

Palabras clave— Arenas de fracking, Visión Artificial, Distribución Granulométrica, Redondez, Esfericidad.

I. INTRODUCCIÓN[1]

La extracción de hidrocarburos no tradicionales en esquistos está en rápido crecimiento en todo el mundo. En la Argentina, fundamentalmente a partir del yacimiento de Vaca Muerta, representa una parte sustancial de las reservas de gas y crudo del país.

La forma de extracción de este tipo de yacimientos es mediante fracturamiento hidráulico (fracking), el cual es el proceso de aplicación de presión hidráulica a la roca reservorio hasta que se produce una falla o fractura de la misma mediante la inyección a alta presión de un fluido viscoso. Pero precisamente cuando la fractura ha sido lograda, debe ser apuntalada para que no colapse, lo cual se logra por la inyección de arena. La misma cumple una segunda función: permitir la conductividad del hidrocarburo entre los espacios que quedan entre grano y grano de arena.

Para que la arena actúe apropiadamente como apuntalante o "propante", debe resistir las altas presiones usadas en el proceso, del orden de los 10000 psi. Esta capacidad es clave para el éxito del proceso. Para determinar la resistencia de la arena, se reconocen como base las normas del American Petroleum Institute API RP 19 B, la cual define un ensayo a la compresión para determinar el porcentaje de fractura. Pero también son de rigor, según la norma API 19C [1], el análisis de distribución granulométrica y las medidas geométricas de redondez y esfericidad.

En cuanto a la distribución granulométrica, la misma se hace por tamizado tomando en cuenta los tamaños establecidos en las mallas estándar de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales ASTM [2] que se detalla en la Tabla 1.

La distribución granulométrica se obtiene según el peso retenido en cada una de las mallas, calculando luego a partir de éstos el peso acumulado. Cuando se realiza un ensayo de compresión, se analiza nuevamente la distribución granulométrica, y debe verificarse que el porcentaje de finos por debajo de una cierta medida no supere un 10% del total.

[1]Contacto: Oscar Daniel Chuk. Dirección: Facultad de Ingeniería UNSJ, Av. Lib. S. Martín Oeste N°1109, San Juan, Celular: +542 9 24644111085, dchuk@unsj.edu.ar.

TABLA I
MALLAS ESTÁNDAR ASTM

Malla	Apertura mm	Malla	Apertura mm	Malla	Apertura mm
4	4,76	18	1	60	0,25
5	4	20	0,841	70	0,21
6	3,35	25	0,707	80	0,177
8	2,38	30	0,595	100	0,149
10	2	35	0,5	200	0,074
12	1,68	40	0,42	325	0,044
14	1,41	45	0,354	400	0,037
16	1,19	50	0,297		

Por otro lado, en lo referente a la determinación de la redondez y esfericidad, se trata de valores determinantes pues se sabe que si ambos no superan un mínimo de 0.6 (en un rango posible de 0-1), la arena no soportará las presiones exigidas.

Según las normas citadas la medición recae en la observación de 20 granos tomados al azar por parte de un operador, por asimilación a las imágenes de una cartilla de referencia propuesta por Krumbein y Sloss [3]. Estos autores desarrollaron sus medidas en base a las expresiones de Wadell [4–6], pero la aplicación de sus fórmulas es muy complicada en la práctica; de allí la existencia de la cartilla y la intervención de un observador humano. Esta metodología padece de una fuerte dependencia del criterio de dicho observador, lo cual deriva en resultados sustancialmente disímiles que invalidan el procedimiento, aunque es el que se sigue por norma. Asimismo, es cuestionable la validez estadística de la observación, con tan solo 20 granos. El carácter "azaroso" de la selección de los mismos también recae en el operador.

El uso de la visión artificial es una alternativa eficaz para lograr una medida objetiva de las propiedades geométricas de partículas, de lo cual Rodriguez [7] presenta una detallada revisión del estado del arte.

La bibliografía existente cubre la determinación de la distribución granulométrica [8], como así también esfericidad [9] y la redondez [10,11], sin dejar de lado otros indicadores como el factor de forma, la concavidad y la convexidad [12]. Las aplicaciones van desde la evaluación de yacimientos hasta el estudio de características de las superficies de otros planetas [13], pasando por aplicaciones al cemento [14] y a la calidad de frutas [15,16].

Aunque, como en este trabajo, la mayoría de las determinaciones se realizan en el plano, se están desarrollando también las extensiones de estas medidas en tres dimensiones [17,18].

En este artículo se presentan los desarrollos realizados usando técnicas de visión artificial en 2D para realizar las determinaciones anteriormente citadas.

II. DESARROLLO

Las determinaciones se realizan en base a imágenes microscópicas de arenas como la que se presenta en la Fig. 1.

El análisis del color predominante en cada partícula se usa para calcular una proporción de las distintas especies minerales presentes en la muestra. Por ejemplo, en la Fig. 1 las cristalinas corresponden a un cuarzo hialino y las que tienen mayor contenido de rojo a un feldespato. Esta operación era tradicionalmente realizada por un operador por conteo manual.



Fig. 1: Imagen base para análisis por visión artificial.

La imagen pasa por un proceso de transformación a escala de grises, contrastado y conversión final a una versión binaria en blancos y negros. Para separar las partículas que se hallan contiguas se aplica un procedimiento basado en la técnica de divisoria de aguas [19], llegándose finalmente a identificar el contorno de cada partícula.

A. Determinación de la distribución granulométrica.

A los fines del análisis de tamaño se identifica el contorno de la partícula con su elipse equivalente, que es la que tiene el mismo momento de segundo orden que la imagen en 2D original de la partícula [20]. Véase la Figura 2.

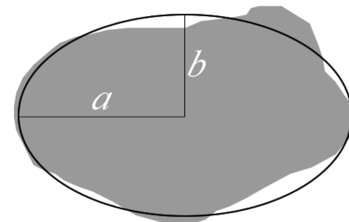


Fig. 2: Contorno de la partícula y su elipse equivalente

Al momento de clasificar los granos de arena en clusters de tamaños se toma en cuenta el eje menor $2b$, ya que en el proceso equivalente de tamizado mecánico cada partícula atravesará la malla a través de su menor dimensión.

Como es necesario calcular los pesos correspondientes deben determinarse los pesos aproximados de cada partícula. Para ello debe calcularse primero su volumen para lo que se recurre al método del elipsoide (Ver Fig. 3) donde, en primera instancia, se calcula el volumen como

$$V = \frac{4}{3}\pi abc \qquad (1)$$

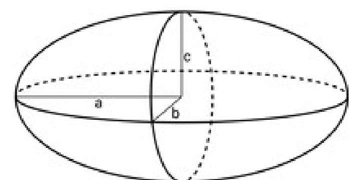


Fig. 3. Cálculo de volumen de un elipsoide

Ahora bien, es de suponer que la partícula está acostada sobre la superficie de la fotografía a lo largo de sus dimensiones mayores a y b, y que la dimensión c del tercer

eje, no determinable en la imagen es semejante al eje menor visible *b*. En este caso

$$V = \frac{4}{3}\pi a b^2 \quad (2)$$

Por el mismo motivo también es de suponer que entre los dos ejes menores b y c la partícula está apoyada según la medida más grande de ellas, por lo que *c* puede ser levemente menor que *b*, por lo que se puede estimar $c = kb$, con $k \simeq 0.9$. Así, finalmente se puede calcular

$$V = \frac{4}{3}k\pi a b^2 \quad (3)$$

La Figura 4 muestra el resultado de aplicar esta técnica a una muestra típica de arenas de fracking.

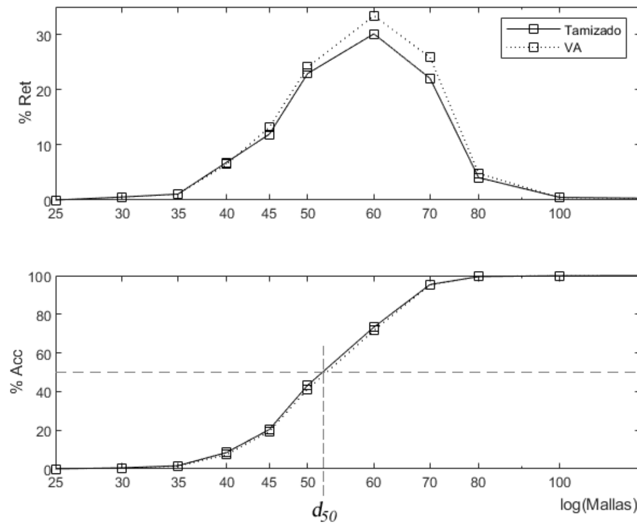


Fig. 4. Distribución granulométrica comparada.

Las líneas llenas muestran la distribución de la muestra de referencia por tamizado y las líneas a trazos los valores aproximados por visión artificial obtenidos a partir del análisis de 1873 partículas en 29 fotografías. Los ejes de abscisas están graduados en mallas según la Tabla 1, en escala logarítmica. Las diferencias en los pesos retenidos oscilan alrededor del 5%, y se minimizan en los pesos acumulados. Concretamente, el dato característico del d_{50}, tamaño que divide los pesos por mitades, no exhibe diferencias notables entre el método de visión artificial y el de tamizado. En este caso correspondería a unos 0.28 mm, correspondientes a un valor intermedio entre las mallas 50 y 60.

Cuando se realiza un ensayo a la compresión, las curvas se corren hacia la derecha, es decir hacia los finos, y es fácil determinar a partir de la curva de pesos acumulados si el porcentaje de finos ha crecido más del 10% admisible.

B. Esfericidad y redondez

El desarrollo realizado por visión artificial provee un mecanismo seguro de determinación de estas medidas no dependiente de las subjetividades de un evaluador humano. Entre las distintas formas de medir la esfericidad [21], se ha elegido en este estudio la relación entre ejes menor y mayor

$$S = b/a \quad (4)$$

Esta es la definición que más se ajusta a los valores de la ya citada carta de Krumbein y Sloss que se usa como parámetro normativo en el estándar API19C.

En cuanto a la redondez, se sigue la definición dada por Wadell [4-6]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N} r_i / N}{r_{max_in}} \quad (5)$$

Donde r_i es el radio de curvatura de las esquinas, definiéndose las mismas como “aquellas partes del contorno de un área que tiene un radio de curvatura menor o igual que el radio de curvatura del máximo círculo inscripto $r_{max\text{-}in}$ en la misma área”. N es la cantidad de bordes convexos encontrados. Véase la Figura 5.

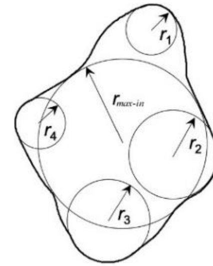


Fig. 5. Radios de curvatura de esquinas y máximo círculo inscripto.

La forma de realizar en la práctica el cálculo de (5) es compleja, y se ha encarado de distintas formas. Se han usado procedimientos estrictamente geométricos como el de Hryciw [22] y Zheng [23], y asimismo otras aproximaciones como el cálculo a partir de la transformada de Fourier [24,25], o la optimización basada en enjambres de partículas [26]. En este trabajo se ha usado una red neuronal que se alimenta de distintas medidas que se pueden realizar a partir de la imagen de la partícula en 2D, tal como se describe en [27].

El entrenamiento de la red se ha efectuado con un conjunto de 1300 imágenes de referencia diseñado por los autores, el cual está libremente disponible en [28].

III. RESULTADOS

Como se ha mostrado en la Figura 4, el algoritmo muestra consistentemente la distribución granulométrica de la muestra de arena de fracking.

La esfericidad calculada con (4) muestra un alto Coeficiente de correlación de 0.98 con los valores teóricos del banco de referencia usado como control.

El Coeficiente de correlación obtenido en el cálculo de redondez tomando en cuenta cada partícula es de 0.93. Sin embargo, al tomar promedios de partículas con la misma redondez, el grado de correlación crece a 0.99, con una recta de ajuste de 0.9*Rteórica* + 0.051. Véase la Figura 6.

Si bien es preferible que las imágenes necesarias para alimentar el algoritmo provengan de un microscopio con alto aumento, acompañado de una cámara de alta precisión, del orden de los 5Mpíxeles, los resultados obtenidos con imágenes de poca precisión –un microscopio USB estándar de bajo costo- han dado también resultados consistentes.

La validez de los resultados obtenidos ha llevado asimismo a la presentación ante el Instituto Nacional de

Propiedad Industrial INPI de una solicitud de Patente del Procedimiento señalado en [25].

Por supuesto, el uso del algoritmo es igualmente efectivo para otro tipo de partículas distintas de las arenas.

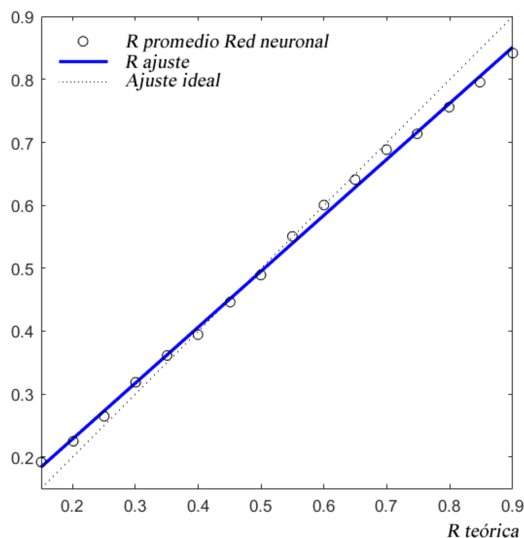


Fig. 6. Ajuste de las medidas obtenidas de redondez a los valores teóricos del banco de referencia.

A partir de los algoritmos desarrollados se ha elaborado asimismo un software que permite una interfaz sencilla con el operador, permitiendo un análisis ágil de muestras y resultados. El paquete contiene un módulo de toma de fotografías, uno de análisis (Ver Figura 7) y uno de presentación de estadísticas.

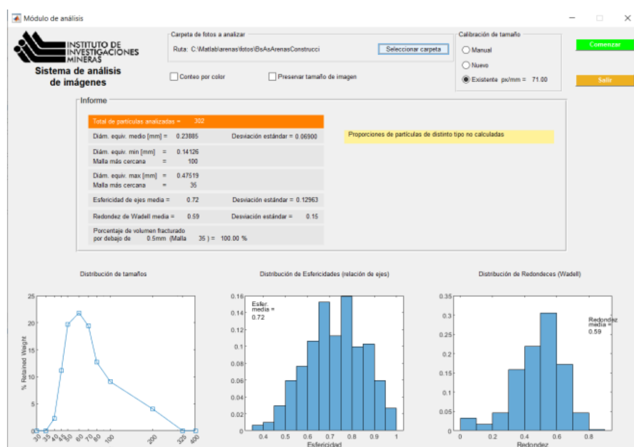


Fig. 7. Análisis geométrico. Interfaz con el operador.

IV. Conclusiones

Los valores de correlación obtenidos demuestran que se ha logrado un procedimiento de medición de las medidas geométricas necesarias para asegurar la calidad de una arena de fracking que es seguro, repetitivo, rápido y que no depende de la subjetividad de un operador.

Los algoritmos desarrollados en este estudio han conducido al desarrollo de un software de fácil uso que permitirá un mejor aprovechamiento de los yacimientos de arenas de fracking.

V. Próximos desarrollos

Al momento de presentar este trabajo se está puliendo el software de determinaciones geométricas y se avanza en el uso de redes neuronales convolucionales [29] aplicadas a la determinación de la esfericidad y redondez.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento otorgado a través del Proyecto PDTS 80020190200032SJ “Desarrollo de un algoritmo de análisis de calidad de arenas de fracturación basado en visión artificial”, y del Proyecto CICITCA 10120200100226SJ “Clasificación de partículas de arena de fracturación mediante redes neuronales convolucionales”, los cuales han permitido llevar adelante este trabajo.

Asimismo, agradecen el apoyo brindado por las Empresas VONO SA y Nivel Construcciones SRL por su compromiso como demandantes de los resultados obtenidos.

Referencias

[1] American Petroleum Institute *API 19C, Second Edition: Measurement of Properties of Proppants Used in Hydraulic Fracturing and Gravel-Packing Operations*; API Publishing Services: Washington, D.C., 2008;

[2] *Manual on Test Sieving Methods: Guidelines for Establishing Sieve Analysis Procedures*; Smith, T., ASTM Committee E-29 on Particle and Spray Characterization, Eds.; ASTM manual series; 5th edition.; ASTM International: West Conshohocken, PA, 2014; ISBN 978-0-8031-7046-9.

[3] Krumbein, W.C.; Sloss, L.L. *Stratigraphy and Sedimentation*; 2nd ed.; W.H. Freeman: San Francisco, 1963;

[4] Wadell, H. Volume, Shape, and Roundness of Rock Particles. *Jour. Geol.* 1932, *XL, N°5*, 443–451.

[5] Wadell, H. Sphericity and Roundness of Rock Particles. *Jour. Geol.* 1933, *XLI, N°3*, 310–331.

[6] Wadell, H. Volume, Shape and Roundness of Quartz Particles. *Jour. Geol.* 1935, *XLIII, N°3*, 258–280.

[7] Rodriguez, J.M. Importance of the Particle Shape on Mechanical Properties of Soil Materials. Licenciate Thesis, Luleå University of Technology: Luleå, 2013.

[8] Andersson, T. Estimating Particle Size Distributions Based on Machine Vision. Doctoral Thesis, Luleå University of Technology: Luleå, 2010.

[9] Mora, C.K. Sphericity, Shape Factor, and Convexity Measurement of Coarse Aggregate for Concrete Using Digital Image Processing. *Cement and Concrete Research* 2000, *30(3)*, 351–358.

[10] Roussillon, T.; Piégay, H.; Sivignon, I.; Tougne, L.; Lavigne, F. Automatic Computation of Pebble Roundness Using Digital Imagery and Discrete Geometry. *Computers & Geosciences* 2009, *35*, 1992–2000, doi:10.1016/j.cageo.2009.01.013.

[11] Drevin, G.R. Computational Methods for the Determination of Roundness of Sedimentary Particles. *Math Geol* 2007, *38*, 871–890, doi:10.1007/s11004-006-9051-y.

[12] Altuhafi, F.; O'Sullivan, C.; Cavarretta, I. Analysis of an Image-Based Method to Quantify the Size and Shape of Sand Particles. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2013, *139*, 1290–1307, doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000855.

[13] Charalambous, C. On the Evolution of Particle Fragmentation With Applications to Planetary Surfaces. Doctoral Thesis, Imperial College London, 2015.

[14] Maguesvari, M.U.; Narasimha, V.L. Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2013, *104*, 198–207, doi:10.1016/j.sbspro.2013.11.112.

[15] Charoenpong, T.; Chamnongthai, K.; Kamhom, P.; Krairiksh, M. Volume Measurement of Mango by Using 2D Ellipse Model. In Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT '04.; December 2004; Vol. 3, pp. 1438-1441 Vol. 3.

[16] Díaz-Sánchez, D.D.; López-Sánchez, H.; Silva-Rojas, H.V.; Gardea-Béjar, A.A.; Cruz-Huerta, N.; Ramírez-Ramírez, I.; González-Hernández, V.A.; Díaz-Sánchez, D.D.; López-Sánchez, H.; Silva-Rojas, H.V.; et al. Pungency and Fruit Quality in Mexican Landraces of Piquín Pepper (Capsicum Annuum Var. Glabriusculum) as

Affected by Plant Growth Environment and Postharvest Handling. *Chilean journal of agricultural research* 2021, *81*, 546–556, doi:10.4067/S0718-58392021000400546.
[17] Garboczi, E.J. Three-Dimensional Mathematical Analysis of Particle Shape Using X-Ray Tomography and Spherical Harmonics: Application to Aggregates Used in Concrete. *Cement and Concrete Research* 2002, *32*, 1621–1638, doi:10.1016/S0008-8846(02)00836-0.
[18] Bullard, J.W.; Garboczi, E.J. Defining Shape Measures for 3D Star-Shaped Particles: Sphericity, Roundness, and Dimensions. *Powder Technology* 2013, *249*, 241–252, doi:10.1016/j.powtec.2013.08.015.
[19] Rodríguez Medina, C.G.; Chuk, O.D.; Luna, A.; Bertero, R.; Núñez, E.A.; Trigo, P. Aplicación Del Algoritmo de Watershed Para Análisis de Calidad de Arenas Para Fracking.; Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina, October 25 2018.
[20] Flusser, J.; Suk, T. Rotation Moment Invariants for Recognition of Symmetric Objects. *IEEE Trans. on Image Process.* 2006, *15*, 3784–3790, doi:10.1109/TIP.2006.884913.
[21] Rodriguez, J.; Edeskär, T.; Knutsson, S. Particle Shape Quantities and Measurement Tecniques - A Review. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 2013, *18(A)*, 169–198.
[22] Hryciw, R.D.; Zheng, J.; Shetler, K. Particle Roundness and Sphericity from Images of Assemblies by Chart Estimates and Computer Methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2016, *142*, 04016038, doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001485.
[23] Zheng, J. Particle Roundness and Sphericity Computation 2016.
[24] Hernandez, E.M.; Chavez, G.M.; Hernandez, J.V. Roundness Estimation of Sedimentary Rocks Using Eliptic Fourier and Deep Neural Networks. In Proceedings of the 2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC); IEEE: Ixtapa, Mexico, November 4 2020; pp. 1–5.
[25] Chuk, O.D.; Rodriguez Medina, C.G.R.; Luna, A. Roundness Calculus of Fracking Sands Using Artificial Vision and Fourier Transform. In Proceedings of the Anales de XV Jornadas de Tratamiento de Minerales; UNSJ: San Juan, Argentina., 2021.
[26] Sun, T.-H. Applying Particle Swarm Optimization Algorithm to Roundness Measurement. *Expert Systems with Applications* 2009, *36*, 3428–3438, doi:10.1016/j.eswa.2008.02.072.
[27] Luna, A.; Chuk, O.D.; Rodriguez Medina, C.G. Análisis de Calidad de Arenas de Fracturación Mediante Visión Artificial.; UBA: Buenos Aires, Argentina, October 5 2021.
[28] Chuk, O.D. Repository of 2D Shapes with Known Roundness and Sphericity. 2022, *1*, doi:10.17632/ysky8r2wkd.1.
[29] Liang, Z.; Nie, Z.; An, A.; Gong, J.; Wang, X. A Particle Shape Extraction and Evaluation Method Using a Deep Convolutional Neural Network and Digital Image Processing. *Powder Technology* 2019, *353*, 156–170, doi:10.1016/j.powtec.2019.05.025.